

文章编号:1006-9941(2022)04-0379-06

# 多染焰剂协同紫光辐射烟火药配方设计

霸书红,刘琪,徐博明,杨雨龙

(沈阳理工大学装备工程学院,辽宁沈阳110159)

**摘要:** 为理论设计和优化多染焰剂协同辐射紫光的烟火药配方。基于色光混合原理,提出一种含红光和蓝光双染焰剂的紫光烟火药配方,利用REAL计算程序确定不同色光发射体的种类及含量,通过MATLAB程序计算不同配方的色坐标、波长、色纯度和绘制色度图,进而确定优化紫光烟火药配方。研究表明,确定紫光烟火药理论最佳配方为 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/2\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2/\text{Al}/\text{C}_6\text{H}_9.6\text{O}_{1.6}$ ,配比为48/32/12/8,氧平衡为 $-0.11\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,色光发射体分别为Sr、SrO、SrOH、CuO、CuOH、CuH,紫光色坐标点为(0.2449, 0.1497),紫光虚拟主波长为446 nm,色纯度为0.40。实验测得上述相同配方的色坐标为(0.2425, 0.1588),紫光虚拟主波长为439 nm,色纯度为0.44,该紫光实际上是由766 nm红光和418 nm蓝光混合而成,具有良好的紫光效果。仿真预测结果与实验结果良好吻合,该设计方法可为其它多染焰剂色光烟火药配方优化及相关问题的研究提供理论基础。

**关键词:** 紫光烟火药;多染焰剂;理论设计;配方优化

中图分类号: TJ55; TJ411.7

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021343

## 1 引言

色光烟火药是由氧化剂、可燃剂、染焰剂及黏合剂等组成的机械混合物,染焰剂不同产生火焰颜色就不同<sup>[1]</sup>。2015年,Dominykas等<sup>[2]</sup>通过比较溴化铜和氯化铜的发射光谱,合成了溴酸铜,用溴酸铜作为蓝光烟火药配方的氧化剂和染焰剂,通过测试色坐标、燃烧速率、发光强度对含铜和溴酸钾的蓝光烟火药配方进行了优化。2017年,Anirudha等<sup>[3]</sup>提出用火焰的颜色和发光强度对烟火药进行表征,对5种色光烟火药的燃烧产物和燃烧温度进行了理论计算,理论预测结果与实验结果一致,验证了颜色预测方法的合理性。2018年,霸书红<sup>[4]</sup>利用REAL程序优化蓝光烟火药配方,得出最佳蓝光烟火药配方为 $\text{KClO}_3/2\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2/\text{S}$ ,其配比为63/19/18,实现了烟火药配方设计从实验为主到理论设计的转变。2018年,Glück<sup>[5]</sup>为了解决传统红光烟火药燃烧危害人体健康和环境的问题,提出了一种红色、无氯、无铈的烟火药配方为镁/硝酸锂/六铵/

黏结剂,实验证明该配方具有较好的发光强度。2019年,Glück等<sup>[6]</sup>提出了用碘酸铜或者溴酸铜为蓝光烟火药的染焰剂,提出的最佳配方为碘酸铜/5-氨基-1H-四唑/镁/碘化铜/环氧树脂,主波长473nm,色纯度高达65%,燃烧发出良好蓝色火焰。2019年,Dufter等<sup>[7]</sup>提出了一种双(偶氮)硼酸盐的锂盐为红光烟火药的配方,用双(偶氮)硼酸锂盐替代铈盐和氯酸盐,实验发现锂盐也会使烟火药的火焰呈现红色。2019年,Sadek等<sup>[8]</sup>报道了一种通过三原色色光火焰复合辐射产生新型色光的烟火药配方,通过对蓝色、绿色、红色等优质单色光火焰按适当比例混合,实验得出了高质量的紫罗兰色、甜粉红、万寿菊色等复合色光烟火药配方,为开发新型复合色光火焰提供了实例。2020年,Ermakova等<sup>[9]</sup>提出用稀土金属元素制成的荧光粉改变色光烟火药的色度,将配制的荧光粉加入到色光烟火药中,通过改变荧光粉的含量可以改变色光烟火药的色度。

目前,色光烟火药的发展主要表现在3个方面:一是色光烟火药从使用含氯组分到使用无氯组分,向环保型配方发展;二是色光烟火药的配方设计从以实验为主发展到以理论设计为主;三是从单染焰剂辐射发光到多染焰剂协同辐射发光。然而,对于多染焰剂协

收稿日期:2021-12-27;修回日期:2022-01-23

网络出版日期:2022-02-21

作者简介:霸书红(1970-),男,博士,教授,从事新型含能材料及光电对抗效应研究。e-mail:shuhongba@163.com

引用本文:霸书红,刘琪,徐博明,等.多染焰剂协同紫光辐射烟火药配方设计[J].含能材料,2022,30(4):379-384.

BA Shu-hong, LIU Qi, XU Bo-ming, et al. Formulation Design of Purple-Light-Emitting Pyrotechnic Compositions with Multi Flame Colorants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(4):379-384.

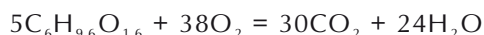
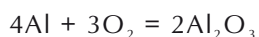
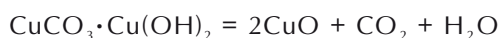
同辐射发光的烟火药研究较少,仅限于配方的试验研究。根据色光混合原理,采用不同染焰剂和按不同比例配制药剂,可制造出许多不同色彩的色光烟火药。为此,本研究通过对多染焰剂协同辐射紫光烟火药的理论设计,确定和计算不同色光发射体的种类和含量、色坐标点位置、紫光辐射主波长大小和紫光色纯度高低,建立多染焰剂协同辐射紫光烟火药配方优化的理论设计新方法,进而为开发其它多染焰剂协同辐射色光烟火药奠定理论基础。

## 2 多染焰剂协同紫光辐射烟火药的理论设计

烟火药燃烧产生紫光不能通过气态原子或气态分子直接辐射得到。因此对于紫光烟火药的配方设计,需借助多染焰剂协同作用,通过不同色光混合得到紫光。紫光可由红光和蓝光混合而成,但其光谱仍为红光和蓝光的谱带,即不影响光谱辐射特性。为此,采用产生红光和蓝光的双染焰剂,提出无氯多染焰剂协同辐射紫光的烟火药新配方,利用REAL程序计算确定发射体种类及含量,计算氧平衡,通过MATLAB程序计算不同配方的色坐标、主波长、色纯度和绘制色度图,显示计算结果,进而优化紫光烟火药配方。

### 2.1 氧平衡计算

紫光烟火药各组分完全反应方程如下:



其氧平衡值计算公式为:

$$\text{OB} = \text{OB}_1 X_1 + \text{OB}_2 X_2 + \text{OB}_3 X_3 + \text{OB}_4 X_4 \quad (1)$$

式中, $\text{OB}_1$ 、 $\text{OB}_2$ 、 $\text{OB}_3$ 和 $\text{OB}_4$ 分别为配方中4种组分的氧平衡值; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和 $X_4$ 分别为配方中4种组分所占的质量分数。

### 2.2 紫光辐射色坐标计算

通过色坐标的理论计算可预测烟火药燃烧发光火焰的颜色。利用REAL程序计算确定出紫光烟火药的色光发射体种类及含量,根据不同色光发射体的色坐标和摩尔分数计算得到辐射紫光的色坐标。计算公式为:

$$x_n = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_{n-1} x_{n-1} \quad (2)$$

$$y_n = \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 + \cdots + \alpha_{n-1} y_{n-1} \quad (3)$$

式中, $(x_n, y_n)$ 为所求紫光的色坐标; $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $\cdots$ 、 $(x_{n-1}, y_{n-1})$ 为第一发射体、第二发射体、 $\cdots$ 、第 $n-1$ 发射体的色坐标; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\cdots$ 、 $\alpha_{n-1}$ 为不同色光发射体对

应的摩尔分数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_{n-1} = 1$ 。不同色光发射体的色坐标<sup>[10]</sup>见表1。

表1 不同色光发射体的色坐标

Table 1 Chromaticity coordinates of different colored light emitters

radiator	x	y	radiator	x	y
Sr	0.141	0.033	CuO	0.315	0.187
SrO	0.593	0.406	CuOH	0.290	0.666
SrOH	0.679	0.321	CuH	0.167	0.009
SrCl	0.720	0.280	CuCl	0.156	0.073

### 2.3 虚拟主波长计算

对于混合色光,通过计算色坐标和虚拟主波长,可以预测其发光颜色。由数种色光相混合可组成相当于某一虚拟主波长下单色辐射相同颜色的光,如由波长590 nm和630 nm的光相混合时,可组成相当于虚拟主波长为610 nm的单色光,虚拟主波长在光谱图上实际并不存在,其光谱仍表现为590 nm和630 nm的两条谱线。在色度图中(如图1),由等能白光点A向样品色坐标点 $S_1$ 引一直线,延长直线与光谱轨迹交于L点,则L点的光谱色波长就是样品色坐标点 $S_1$ 对应的虚拟主波长。当样品色坐标点 $S_2$ 落在380nm(C点)、700nm(B点)和等能白光点A连成的三角形区域内,无法计算其对应的虚拟主波长,所以引入补色波长的概念,即某一波长的单色光与色坐标点对应的单色光互补呈白光,则该波长为色坐标点对应的补色波长。

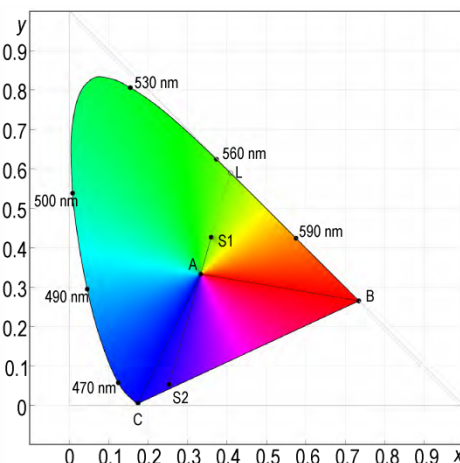


图1 补色波长计算示意图

Fig. 1 Diagram of wavelength calculation of complementary colors

补色波长的计算是通过求连接样品色坐标点 $S_2$ 和等能白光点A直线的斜率而得到,计算公式为:

$$k_1 = \frac{x_n - x_w}{y_n - y_w} \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{y_n - y_w}{x_n - x_w} \quad (5)$$

式中,  $x_n$  为紫光烟火药横坐标;  $y_n$  为紫光烟火药纵坐标;  $x_w$  为等能白光点横坐标;  $y_w$  为等能白光点纵坐标。在  $k_1$ 、 $k_2$  中选择绝对值较小的值, 通过查表<sup>[11]</sup>可得样品色坐标点对应的补色波长, 利用补色律公式<sup>[12]</sup>可计算其虚拟主波长, 计算公式为:

$$(\lambda_1 - 565.52) \cdot (497.78 - \lambda_2) = 233.02 \quad (6)$$

#### 2.4 色纯度计算

联立  $AS_2$  和红蓝光谱轨迹  $BC$  直线方程组成方程组, 可求得两条直线的交点  $(x_\lambda, y_\lambda)$ , 将  $x_\lambda$  和  $y_\lambda$  代入式(7)可求出紫光色纯度  $P$ , 其中等能白光点  $A$  坐标为  $(0.3333, 0.3333)$ ,  $S_2$  点为紫光点坐标  $(x_n, y_n)$ , 红蓝光谱轨迹端点  $B$  坐标为  $(0.73469, 0.26531)$ ,  $C$  坐标为  $(0.17411, 0.00496)$ 。

$$P = \frac{y_\lambda}{y_n} \cdot \frac{x_n - x_w}{x_\lambda - x_w} \quad (7)$$

式中,  $x_n$  为紫光烟火药横坐标;  $y_n$  为紫光烟火药纵坐标;  $x_w$  为等能白光点横坐标。

#### 2.5 紫光烟火药配方优化

基于多染焰剂协同作用, 提出一种紫光烟火药配方为  $Sr(NO_3)_2/2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2/Al/C_6H_9.6O_{1.6}$ , 其中红光染焰剂为硝酸锶, 蓝光染焰剂为碱式碳酸铜, 可燃剂为铝粉, 黏合剂为虫胶。按照 1 kg 装药量计算, 硝酸锶与碱式碳酸铜的初始用量比设为 480:320(质量比), 铝粉用量设为 120 g, 虫胶用量设为 80 g。在此基础上, 保持可燃剂  $m_{\text{可燃剂}}$  和黏合剂  $m_{\text{黏合剂}}$  用量不变的条件下, 改变红光染焰剂  $m_{\text{RED}}$  与蓝光染焰剂  $m_{\text{BLUE}}$  的用量比, 利用 REAL 程序确定紫光烟火药燃烧产生色光发射体的种类和含量, 计算结果见表 2。

从表 2 可以得出, 所有烟火药中的色光发射体均为 Sr、SrO、SrOH、CuO、CuOH、CuH, 通过调节红光染焰剂与蓝光染焰剂的比例, 可以控制火焰中不同色光发射体的含量, 进而实现产生紫光的目的。

利用 MATLAB 程序计算了上述紫光烟火药的氧平衡、色坐标、虚拟主波长和色纯度, 计算结果见表 3, 并绘制出每一种配方的色度图。

从表 3 可以看出, 配方 a、配方 b、配方 c 的色坐标均落在色度图的蓝紫色区, 对应的火焰颜色应为蓝紫色, 3 个配方的虚拟主波长均为 462 nm; 配方 d 的色坐标落在色度图的紫色区中心, 对应的火焰颜色应为紫

表 2 色光发射体的种类与含量

Table 2 Types and contents of colored light emitters

No.	$m_{\text{RED}}/m_{\text{BLUE}}$	types and contents of colored light emitters				No.	$m_{\text{RED}}/m_{\text{BLUE}}$	types and contents of colored light emitters			
a	420/380	Sr	0.000	CuO	0.047	d	480/320	Sr	0.008	CuO	0.094
		SrO	0.001	CuOH	0.116			SrO	0.014	CuOH	0.142
		SrOH	0.006	CuH	0.830			SrOH	0.080	CuH	0.661
b	440/360	Sr	0.001	CuO	0.053	e	490/310	Sr	0.016	CuO	0.098
		SrO	0.001	CuOH	0.128			SrO	0.032	CuOH	0.130
		SrOH	0.007	CuH	0.811			SrOH	0.160	CuH	0.564
c	460/340	Sr	0.001	CuO	0.065	f	500/300	Sr	0.024	CuO	0.100
		SrO	0.001	CuOH	0.140			SrO	0.051	CuOH	0.118
		SrOH	0.007	CuH	0.786			SrOH	0.230	CuH	0.477

表 3 不同烟火药性能参数的计算结果

Table 3 Calculation results of performance parameters of different pyrotechnics

No.	formula mass ratio	oxygen balance /g·g <sup>-1</sup>	chromaticity coordinates	light color	virtual dominant wavelength/nm	color purity
a	420/380/120/80	-0.13	(0.1917, 0.0958)	bluish violet	462	0.23
b	440/360/120/80	-0.12	(0.1946, 0.1051)	bluish violet	462	0.20
c	460/340/120/80	-0.11	(0.1978, 0.1152)	bluish violet	462	0.24
d	480/320/120/80	-0.11	(0.2449, 0.1497)	purple	446	0.40
e	490/310/120/80	-0.10	(0.2926, 0.1749)	reddish purple	562	0.41
f	500/300/120/80	-0.10	(0.3357, 0.1969)	reddish purple	561	0.53

色,虚拟主波长分别为446 nm;配方e的色坐标落在色度图的紫色区边缘偏近红紫色区、配方f的色坐标落在色度图的红紫色区,二者对应的火焰颜色应为红紫色,虚拟主波长分别为562 nm和561 nm。再结合色纯度大小,理论确定紫光烟火药的最佳配方为 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2/\text{Al}/\text{C}_6\text{H}_{9.6}\text{O}_{1.6}$ ,其最佳配比为48/32/12/8,氧平衡为 $-0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,色坐标为(0.2449,0.1497),波长为446 nm,色纯度为0.40,最佳配方计算结果见图2。

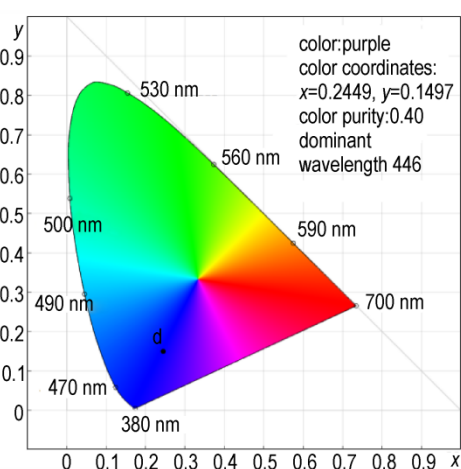


图2 最佳配方的计算结果

Fig.2 Calculation result of the optimal formulation

### 3 性能参数测试

对理论计算得到的6种烟火药配方进行实验研究,通过色坐标、虚拟主波长、火焰颜色与色纯度的测试,来验证多染焰剂协同产生紫光烟火药配方理论设计的正确性。

#### 3.1 试剂与仪器

铝粉,含量 $\geq 99\%$ ,上海超威纳米科技有限公司;硝酸锶,含量 $\geq 99\%$ ,天津市科密欧化学试剂有限公司;碱式碳酸铜,含量 $\geq 99\%$ ,天津市河东区红岩试剂

厂;虫胶,含量 $\geq 99\%$ ,国药集团化学试剂有限公司。

FA2104A电子天平(上海精天电子仪器有限公司);ZNCL-G190\*90智能磁力搅拌器(郑州宇祥仪器设备有限公司);70-1远红外干燥箱(上海阳光实验仪器有限公司);DHG-9030A高温恒温试验箱(无锡博奥试验设备有限公司);OPT2000光谱光度计(北京博迪光电技术有限公司)。

#### 3.2 实验过程

每个配方以5 g药柱为单位进行配制。首先对不同原材料进行预干处理和粉碎,分别将不同原材料过150目筛,按配方配比称取各组分,干混均匀后,利用黏合剂溶液进行湿混,湿混均匀后室温晾干至近干,用50目筛造粒,放入远红外干燥箱烘干备用。

#### 3.3 光谱光度测试

将OPT2000光谱光度计的采光头放入燃烧塔的暗室中,距离药剂0.3 m,使采光头正对药剂火焰中心,连接好仪器,打开测试程序,进行药剂的光谱光度测试,药柱引燃后点击光谱光度计测试软件中“采集”键,燃烧结束后保存数据。6种配比配方的测试结果见表4。

通过实验可以得出,实际测得配方a、配方b和配方c的色坐标均落在色度图的蓝紫色区,虚拟主波长分别为453,450,454 nm,其火焰均呈蓝紫色,紫色不太明显;配方d的色坐标落在色度图的紫色区,虚拟主波长分别为439 nm,火焰呈紫色,见图3;配方e和配方f的色坐标落在色度图的红紫色区,虚拟主波长分别为564 nm和564 nm,其火焰呈红紫色,且红色较为明显。因此确定紫光烟火药最佳配方为 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2/\text{Al}/\text{C}_6\text{H}_{9.6}\text{O}_{1.6}$ ,其配比为48/32/12/8,氧平衡为 $-0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,火焰呈鲜艳紫色,色坐标为(0.2425,0.1588),虚拟主波长为439 nm,色纯度为0.44,这与上述的仿真预测结果吻合良好。

最佳配方的测试结果见图3,光谱曲线见图4。

表4 性能参数测试结果

Table 4 Test results of the performance parameters

No.	formula ratio	chromaticity coordinates	light color	virtual dominant wavelength/nm	color purity
a	42/38/12/8	(0.2057,0.1105)	bluish violet	453	0.21
b	44/36/12/8	(0.2094,0.1176)	bluish violet	450	0.18
c	46/34/12/8	(0.1980,0.1005)	bluish violet	454	0.24
d	48/32/12/8	(0.2425,0.1588)	purple	439	0.44
e	49/31/12/8	(0.2987,0.1947)	reddish purple	564	0.43
f	50/30/12/8	(0.3335,0.2023)	reddish purple	564	0.50

从图4可以得出,紫光烟火药最优配方燃烧时,在418 nm处和766 nm处出现峰值,证明发出的紫光是由418 nm的蓝光和766 nm的红光混合而成。418 nm处

蓝光光谱辐照度只有766 nm处的红光光谱辐照度的1/50~1/100,两者比例相差巨大,说明蓝光对复配产生紫光的影响很大,占主导作用,因此优选蓝光燃焰剂尤为重要。

## 4 结论

根据色光混合原理理论设计了一种多染焰剂协同辐射紫光烟火药配方,采用OPT2000光谱光度计对理论计算结果进行了验证,主要结论如下:

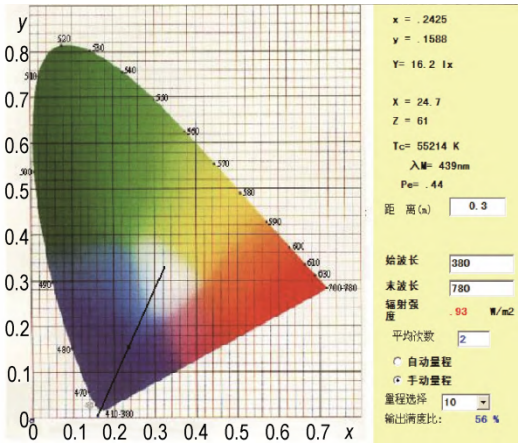
(1) 最优多染焰剂协同辐射紫光烟火药配方为 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2/\text{Al}/\text{C}_6\text{H}_9.6\text{O}_{1.6}$ ,最佳配比为48/32/12/8,氧平衡为 $-0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(2) 理论计算得出色坐标点为(0.2449, 0.1497),虚拟主波长为446 nm,色纯度为0.40,色度图表现为良好紫色。实验测试结果的色坐标为(0.2425, 0.1588),虚拟主波长为439 nm,色纯度为0.44,火焰呈鲜艳紫色,该紫光实际上是由766 nm红光和418 nm蓝光混合而成,且蓝光对复配产生紫光的影响很大,占主导作用,仿真预测结果与实验结果吻合良好。

综上,所提出的多染焰剂协同辐射紫光烟火药配方的理论优化方法可为解决其它多染焰剂协同辐射色光问题的研究提供理论指导。

### 参考文献:

- [1] 霸书红,韩斯宇,刘琪,等. 红光烟火药的国内外研究现状及发展趋势[J]. 科技与创新, 2019(10):65-66.  
BA Shu-hong, HAN Si-yu, LIU Qi, et al. The red light pyrotechnics research status and development trend at home and abroad [J]. *Science and Technology and Innovation*, 2019 (10): 65-66.
- [2] Dominykas J, Eero K, Thomas M, et al. Copper(I) bromide: an alternative emitter for blue-colored flame pyrotechnics [J]. *Chemistry A European Journal*, 2015, 21(43): 15354-15359.
- [3] Anirudha A, Minsung K, Jack J Y. Characterization of display pyrotechnic propellants: Colored light [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1066-1074.
- [4] 霸书红,蒋大千,王树涛. 六种蓝光烟火药的热力学研究[J]. 含能材料, 2018, 26(5):432-435.  
BA Shu-hong, JIANG Da-qian, WANG Shu-tao. Thermodynamic study of six blue pyrotechnic powders [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(5): 432-435.
- [5] Glück J, Klapötke T M, Magdalena R, et al. A strontium and chlorine-free pyrotechnic illuminant of high color purity [J]. *Angewandte Chemie*, 2017, 56(52): 16507-16509
- [6] Glück J, Klapötke T M, Küblböck T. Fine-tuning: advances in chlorine-free blue-light-generating pyrotechnics [J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2020, 2020(4): 349-355.
- [7] Dufter A M W, Klapötke T M, Rusan M, et al. Comparison of



a. measurement results of the optimal formulation



b. flame color of the optimal formulation

图3 最优配方的测试结果及火焰颜色

Fig.3 Measurement results and flame color of the optimal formulation

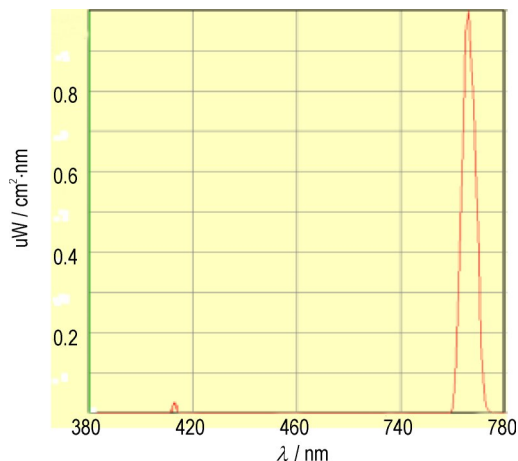


图4 最优配方的光谱图

Fig.4 Spectrogram of the optimum formulation

- functionalized lithium dihydrobis (azolyl) borates with their corresponding azolates as environmentally friendly red pyrotechnic coloring agents [J]. *Chempluschem*, 2020, 85 (9) : 2044–2050.
- [8] Sadek R, Kassem M, et. al. Novel colored flames via chromaticity of essential colors [J]. *Defence Technology*, 2019, 15 (2): 210–215.
- [9] Ermakova Y A, Pominova D V, Voronov V V, et al. Algorithm for calculation of up-conversion luminophores mixtures chromaticity coordinates [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2020, 237: 1–6.
- [10] Meyerriecks W, Kosanke K L. Color values and spectra of the principal emitters in colored flames [J]. *Pyrotechnics*, 2003, (18): 710–731.
- [11] 汤顺青. 色度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 79–80. TANG Shun-qing. *Chromaticity* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 79–80.
- [12] 束越新. 颜色光学基础理论 [M]. 山东科技出版社, 1981: 64–66. SHU Yue-xin. *Basic Theory of Color Optics* [M]. Jinan: Shandong Science of Technology Press, 1981: 64–66.

## Formulation Design of Purple-Light-Emitting Pyrotechnic Compositions with Multi Flame Colorants

BA Shu-hong, LIU Qi, XU Bo-ming, YANG Yu-long

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** The pyrotechnic formulation, that emitting purple light by using the synergetic effect of multi flame colorants, was designed and optimized theoretically. Based on the principle of additive color mixing, one purple-light-emitting pyrotechnic formulation containing flame colorants that generating red and blue colors was proposed. The types and contents of different colored light emitters were determined by REAL program. The color coordinates, wavelengths, color purities and chromaticity diagrams of different formulations were calculated by MATLAB program, and then the optimized pyrotechnic composition with purple light was determined. The theoretical results showed that the optimal formulation of purple-light-emitting pyrotechnics was  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2/\text{Al}/\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_{1.6}$  with the ratio of 48/32/12/8. The oxygen balance of the formulation was  $-0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  and the colored light emitters were Sr, SrO, SrOH, CuO, CuOH, and CuH, respectively. The purple chromaticity coordinate point was (0.2449, 0.1497). The virtual dominant wavelength of purple light was 446 nm, and the color purity was 0.40. The experimental measurements of the above formulation showed that the chromaticity coordinate point was (0.2425, 0.1588), the virtual dominant wavelength of purple light was 439 nm, and the color purity was 0.44. The purple light was actually produced by the mixing of red light (766 nm) and blue light (418 nm), with good purple effect. The simulation results are in good agreement with the experimental results. This design method can provide a theoretical basis for the formulation optimization of other colored-light-emitting pyrotechnic compositions with multi flame colorants and the study of related problems.

**Key words:** purple-light-emitting pyrotechnics; multi flame colorants; theoretical design; formulation optimization

**CLC number:** TJ55; TJ411.7

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021343

(责编: 王艳秀)